

УДК 621.83.06

Е.С. ЛУСТЕНКОВА

Белорусско-Российский университет, г. Могилев

СФЕРИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ В ПРИВОДНЫХ СИСТЕМАХ: АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И КЛАССИФИКАЦИЯ

В статье рассматриваются вопросы создания энергоэффективных механических передач с низкой материалоемкостью и широкими кинематическими возможностями. Проведен анализ сферических механизмов, спроектированных по схеме $2k-h$ с двухвенцовым сателлитом для планетарных передач по классификации В.Л. Кудрявцева. Разработана классификационная схема сферических передач с промежуточными телами качения. На ее основе определены перспективные группы механизмов для создания редукторов, обеспечивающих передаточные отношения в диапазоне 16...200 в одноступенчатом исполнении. На базе сферической роликовой передачи разработан редукторный узел с передаточным отношением 105 для мотор-редуктора.

Ключевые слова: механическая передача, планетарный редуктор, сферический механизм, передаточное отношение, роликовая передача

Введение. В последнее время возрастает интерес к малогабаритным передачам с большими значениями передаточных отношений, используемых в электромеханических приводах различного назначения. Аналитики, оценивавшие американский рынок приводных систем, отмечают, что электромеханические приводы наиболее востребованы для трубопроводной арматуры и грузоподъемных механизмов [1]. Эти приводы низкооборотные, что предполагает значительную редукцию скорости вращения вала электродвигателя при передаче движения на рабочий орган машины. Как свидетельствуют данные источников [2, 3], за последние десятилетия происходит смещение потребности редукторной техники в сторону больших значений передаточных отношений.

Редукторные механизмы также широко используются в кинематических цепях роботов и манипуляторов. В [4] указывается, что редукторы роботов относятся к критическим технологиям Индустрии 4.0 и их стоимость составляет до 36 % от общей стоимости промышленных роботов. В них используются малоинерционные двигатели с постоянными магнитами с высокими частотами вращения и малыми моментами, что также предполагает использование редукторной ступени

с большими значениями передаточных отношений. Например, согласно данным, приведенным в [5], линейка редукторов для роботов обеспечивает диапазон передаточных отношений 50...160.

Целью исследований являлась оценка возможности применения одного из видов сферических механизмов [6] для реализации в одноступенчатом исполнении диапазона передаточных отношений 16...200 как наиболее актуального для низкооборотных электромеханических приводов [7].

Сравнительный анализ конструкций передач. Прототипами исследуемых передач являются планетарные зубчатые передачи. Простейшие передачи, спроектированные по схеме $2k-h$ по классификации В.Л. Кудрявцева, имеют высокий КПД и широко распространены в промышленности. Однако они могут обеспечить передаточное отношение до 12...15. Схема $k-h-v$ расширяет диапазон до 60...80, что, однако, не соответствует установленным требованиям. В качестве прототипа предложено рассматривать передачи с двухвенцовым сателлитом, спроектированные по схеме $2k-h$.

Заменяв плоское движение сателлита планетарной передачи сферическим, можно повысить ее уравнове-

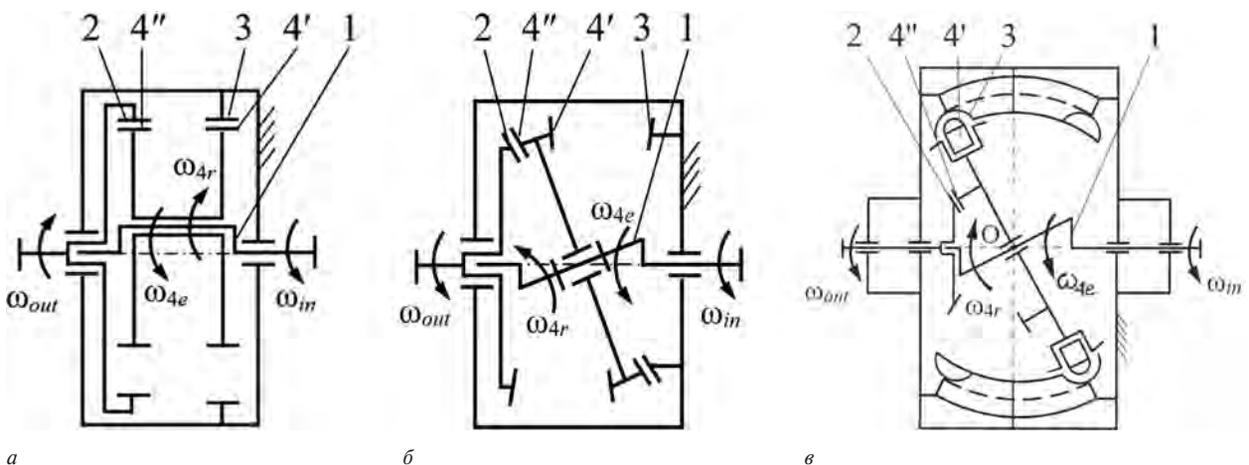


Рисунок 1 — Передачи, сконструированные по схеме $2k-h$ с двухвенцовыми (двухрядными) сателлитами: а — планетарная зубчатая с двухвенцовым цилиндрическим сателлитом; б — планетарная зубчатая с двухвенцовым коническим сателлитом; в — СППТК; 1 — ведущий вал; 2 — центральное колесо, связанное с ведомым валом; 3 — центральное колесо, связанное с корпусом (наружные кулачки, образующие беговую дорожку для СППТК); 4' — число зубьев первого венца сателлита (число тел качения для СППТК); 4'' — число зубьев второго венца сателлита

шенность и снизить массово-габаритные показатели. Сферические передачи с промежуточными телами качения (СППТК) — это механизмы, у которых траектории центров масс роликов (шариков) расположены на сферической поверхности [8].

Для уяснения аналогии кинематических принципов действия зубчатых передач (рисунок 1 а) с кинематическими принципами СППТК сравним их конструкции. На рисунке 1 б показана передача с коническими зубчатыми зацеплениями, она является более уравновешенной, т. к. центр масс сателлита находится на оси передачи. В обоих случаях вращение ведущего вала с угловой скоростью ω_{in} преобразуется в сложное движение сателлита, состоящее из переносного вращения вместе с сателлитом ω_{4e} и относительного вращения около собственной оси ω_{4r} , которое затем передается на ведомый вал ω_{out} . Движение сателлита в первом случае плоское, во втором — сферическое с использованием явления регулярной прецессии. Поэтому передачи на рисунке 1 б называют прецессионными. Передаточное отношение в обоих случаях определяется по формуле

$$i_{12}^{(3)} = \left(1 - \frac{Z_3 \cdot Z_4''}{Z_4' \cdot Z_2} \right)^{-1}, \quad (1)$$

где Z_i — числа зубьев колес, индексы которых приведены на рисунке 1.

На рисунке 1 в показана схема СППТК, в которой сферически движущийся сателлит содержит два венца. В роли первого венца выступает ряд тел качения, установленных в отверстиях на наружной поверхности са-

теллита. Они перемещаются по периодической беговой дорожке, образованной двумя сферическими кулачками в корпусе. Передача движения на ведомый вал осуществляется с помощью конической зубчатой передачи, образованной вторым венцом сателлита и колесом на ведомом валу.

Функцию чисел зубьев в формуле (1) для СППТК выполняют числа периодов беговых дорожек и контактирующих с ними роликов. Предположим наличие в конструкции СППТК не конического зубчатого зацепления, а еще одного ряда тел качения, размещенного на сателлите, контактирующего с беговой дорожкой выходного кулачка, связанного с ведомым валом. Обозначим число периодов беговой дорожки ведомого кулачка Z_2 , а неподвижного кулачка — Z_3 . Так как число роликов в одном ряду на единицу больше, чем число периодов беговой дорожки (кулачкового профиля), контактирующей с ней, т. е. $Z_4' = Z_3 + 1$; $Z_4'' = Z_2 + 1$, то формула (1) с учетом подстановок и преобразований будет записана в виде:

$$i_{12}^{(3)} = \frac{(Z_3 + 1) \cdot Z_2}{Z_2 - Z_3}. \quad (2)$$

Анализ выражения (2) позволяет сделать вывод о реализуемости диапазона передаточных отношений 16...200 с помощью СППТК, спроектированным по схеме $2k-h$ с двухрядным сателлитом.

Классификация СППТК. На рисунке 2 показана разработанная классификационная схема СППТК, штриховым контуром отмечены наиболее перспективные группы передач для решения поставленных задач.

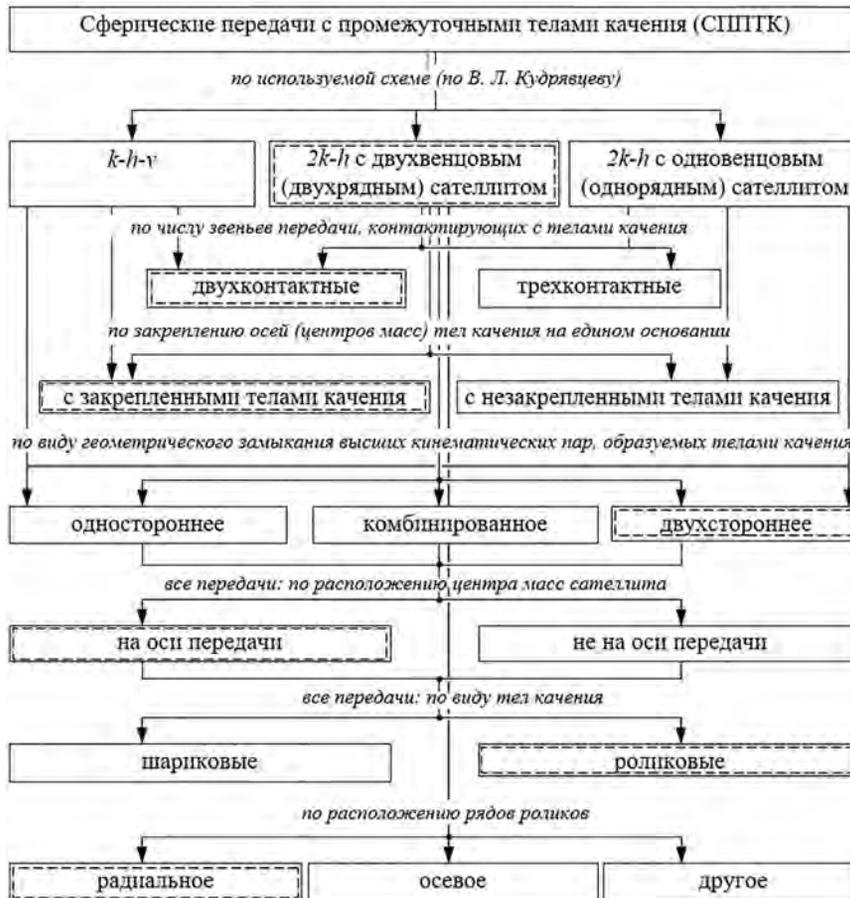


Рисунок 2 — Классификация СППТК

СППТК по числу контактов тел качения с деталями передачи бывают двухконтактные, трехконтактные и с комбинированным контактом (при использовании двух рядов роликов). Недостатками трехконтактных ППТК являются снижение длины контактных линий (и нагрузочной способности) и невозможность обеспечения «чистого» качения (без проскальзывания) при одновременном контакте тел качения с поверхностями 3 элементов (деталей). Это приводит к увеличению скольжения и снижению КПД, прочности и надежности из-за малой толщины сепаратора.

Тела качения при работе передачи образуют высшие кинематические пары с помощью геометрического замыкания, которое может быть односторонним (при контакте с кулачковыми профилями) или двухсторонним (при контакте с беговыми дорожками). При одностороннем замыкании тела усилие передает только половина тел качения, вторая половина совершает холостой пробег. Двухстороннее замыкание теоретически позволяет повысить нагрузочную способность в 2 раза, по сравнению с односторонним, при повышении требований к точности изготовления деталей и их сборке.

Конструкции трехзвенных цилиндрических [9] и сферических [10] передач классифицируются в [11] как передачи со «свободными телами качения». Этот термин применен к СППТК, у которых центры масс (для шариков) или оси (для роликов) не закреплены на общем основании — одной из деталей передачи, расстояние между центрами масс тел качения (или осями) может изменяться в процессе работы. При закреплении осей (центров масс) у тел качения сохраняется возможность осуществлять вращение относительно этих осей (центров) и совершать качение по рабочим поверхностям других деталей. У передач с незакрепленными телами качения возможны заклинивания тел качения (особенно роликов из-за перекоса их осей). Снижение жесткости системы приводит к увеличению износа, шума и вибраций.

Все СППТК разделяются на шариковые и роликовые передачи. Шариковые имеют меньшую нагрузочную способность из-за ограниченности длин контактных линий. Сферические концы роликов (см. рисунок 1 в) позволяют повысить технологичность изготовления беговых дорожек [12, 13].

По расположению беговых дорожек на сферической поверхности СППТК делятся на передачи с размещением средней линии беговых дорожек (центровых кривых кулачковых профилей) в экваториальной плоскости несущей сферической поверхности и вне ее. Во втором случае ухудшаются условия нагружения из-за несимметричности и разных длин участков дорожки по разные стороны от средней плоскости.

В случае применения двух рядов роликов СППТК могут разделяться на передачи с радиальным и осевым (и другим) их расположением. Осевое расположение рядов приводит к более компактной конструкции, однако оно не обеспечивает симметричность беговых дорожек относительно средней (экваториальной) плоскости. Кроме того, различное число роликов в рядах приводит к смещению центра масс сателлита относительно оси передачи и необходимости принятия дополнительных мер по его уравниванию. Радиальное расположение рядов роликов также представляется более рациональным с точки зрения силового анализа: силы урав-

новешиваются относительно центра масс сателлита, если он лежит на оси передачи и совпадает с центром сферического движения.

Таким образом, установлены наиболее перспективные группы сферических передач для решения поставленных задач: двухконтактные сферические роликовые передачи, спроектированные по схеме $2k-h$ с двухрядным сателлитом, с осями роликов, закрепленными на сателлите, с двухсторонним геометрическим замыканием высших кинематических пар, образованных роликами с замкнутыми периодическими беговыми дорожками, причем центр масс сателлита должен быть расположен на оси передачи и совпадать с центром, относительно которого он совершает сферическое движение, а средние плоскости периодических беговых дорожек должны совпадать с экваториальной плоскостью сферической поверхности сателлита.

На основе СППТК с двухрядным сателлитом также был разработан мотор-редуктор с передаточным отношением $i_{12}^{(3)} = 105$ (рисунок 3). Диаметр корпуса редуктора — 146 мм. За счет фрезерования частей поверхности корпуса обеспечена высота центров редуктора 70 мм и возможность соединения с асинхронным электродвигателем АИРЕ 74С1У3. При мощности 0,75 кВт и частоте вращения его вала 1340 мин⁻¹, при номинальном режиме работы двигатель обеспечивает момент на валу, равный 5,35 Н·м.

При обкаточных испытаниях мотор-редуктора в лаборатории испытаний механических приводных систем



Рисунок 3 — Редукторный узел мотор-редуктора:
а — основные детали; б — общий вид

Белорусско-Российского университета при частоте вращения ведомого вала $n_2 = 12,8 \text{ мин}^{-1}$ он обеспечил передачу момента $T_2 = 348 \text{ Н}\cdot\text{м}$, что соответствует среднему расчетному КПД $\eta = 0,62$. Данный результат следует отметить как удовлетворительный для экспериментального образца с учетом передаточного отношения и 9–10 степеней точности изготовления деталей. Он соответствует КПД планетарных зубчатых передач с двухвенцовым сателлитом (0,65) при передаточном отношении, равном 100 [14].

Заключение. На основе проведенного анализа тенденций развития ППТК и разработанных конструкций передач сферического типа разработана классификационная схема СППТК, отличающаяся разделением передач по количеству звеньев, контактирующих с телами качения, по виду геометрического замыкания высших кинематических пар, образуемых телами качения и их фиксации относительно одного из элементов, позволяющая установить рациональные группы механизмов для реализации заданного диапазона передаточных отношений 16...200, обеспечивающие максимальную нагрузочную способность и КПД при минимальных массе и габаритах привода. По результатам испытаний разработанного экспериментального образца передачи для мотор-редуктора были подтверждены теоретически полученные кинематические зависимости и работоспособность СППТК нового типа.

Список литературы

1. Перспективы развития технологии и рынка приводных решений: куда движется привод [Электронный ресурс] / С.А. Алексанин [и др.] // Современные технологии управления. — 2013. — № 11(35). — Режим доступа: <http://sovman.ru/article/3501>. — Дата доступа: 23.05.2018.
2. Заблонский, К.И. Встроенные редукторы / К.И. Заблонский, А.Е. Шустер. — Киев: Техника, 1969. — 176 с.
3. Бостан, И.А. Планетарные прецессионные передачи с многопарным зацеплением / И.А. Бостан. — Кишинев: Штииница, 1991. — 356 с.
4. Global and China Industrial Robot Speed Reducer Industry Report, 2019–2025: Focus on the Chinese Industry [Electronic resource] // Research and Markets. The World's Largest Market Research Store. — Режим доступа: <https://www.researchandmarkets.com/reports/4791057/global-and-china-industrial-robot-speed-reducer>. — Дата доступа: 09.06.2020.
5. Ави Солюшенс. Серия SHG от Harmonic Drive — редукторы для роботов! — Режим доступа: <https://avi-solutions.com/library/statyi/seriya-shg-reduktory-dlya-robotov/>. — Дата доступа: 09.06.2020.
6. Лустенков, М.Е. Совершенствование конструкций сферических передач с промежуточными телами качения / М.Е. Лустенков, Е.С. Лустенкова // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2018. — Вып. 7. — С. 195–198.
7. Лустенков, М.Е. Сферическая роликотая передача с двухрядным сателлитом: силовые расчеты и определение КПД / М.Е. Лустенков, Е.С. Лустенкова // Вестн. Брянского гос. технич. ун-та. — 2019. — № 5. — С. 32–43.
8. Lustenkov, M.E. Load Capacity of Spherical Roller Transmission with Double-Row Pinion Load Capacity of Spherical Roller Transmission with Double-Row Pinion / M.E. Lustenkov, E.S. Lusenkov // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. — 2020. — 795 (2020) 012020. — 6 p.
9. Лустенков, М.Е. Определение основных геометрических параметров планетарных шариковых передач / М.Е. Лустенков // Сборка в машиностроении и приборостроении. — 2008. — № 1. — С. 12–17.
10. Лустенков, М.Е. Оценка кинематических возможностей и КПД сферической и роликотой передач // М.Е. Лустенков, Е.С. Лустенкова // Вестн. машиностроения. — 2019. — № 3. — С. 25–28.
11. Лустенков, М.Е. Теоретические и экспериментальные исследования сферических роликотых передач / М.Е. Лустенков, Е.С. Лустенкова // Вестн. Ижевского гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 20, № 1. — С. 23–27.
12. Технологические аспекты создания рабочих поверхностей передач новых типов: монография / П.Н. Громыко [и др.]. — Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2012. — 209 с.
13. Становской, В.В. Передачи со свободными телами качения, обзор патентной литературы / В.В. Становской, Т.А. Ремнева, С.М. Казакивичус // Прогрессивные зубчатые передачи: сб. науч. тр. / Новоурал. гос. технолог. ин-т; редкол.: А.Е. Беляев [и др.]. — Новоуральск, 2003. — С. 61–94.
14. Иванов, М.Н. Детали машин: учеб. для машиностроительных спец. вузов / М.Н. Иванов, В.А. Финогенов. — 10-е изд., испр. — М.: Высш. шк., 2006. — 408 с.

Lustenkova E.S.

Spherical mechanisms in drive systems: analysis of advanced designs and classification

The article considers the issues of creating energy-efficient mechanical transmissions with low material consumption and wide kinematic capabilities. The analysis of spherical mechanisms designed according to the 2k-h scheme with a two-axis satellite for planetary transmissions according to V.L. Kudryavtsev's classification is carried out. A classification scheme for spherical transmission with intermediate rolling elements has been developed. On its basis, promising groups of mechanisms have been identified for creating speed reducers that provide speed ratios in the range of 16...200 in a single-stage design. On the basis of a spherical roller transmission, a mechanical reducing unit with a speed ratio of 105 for a motor-reducer has been developed.

Поступила в редакцию 27.07.2020.